

神舟七号载人飞船主着陆场区一次雹暴过程综合分析

王红军¹ 何武贵² 杨学艺¹ 余运河³

(¹中国西安卫星测控中心 ²中国总装备部作试局 ³中国总参气象水文空间天气总站)

摘要 着重从数值预报资料入手,结合卫星云图、风廓线雷达、多普勒雷达及自动气象观测资料等对 2008 年 9 月 14 日飞船主着陆场区一次雹暴过程进行分析。结果表明:雹暴过境时气象要素变化剧烈;雹暴前期场区中高层偏北风分量和低层偏南风分量呈增加趋势,垂直风切变显著增大;湿层浅薄,上干下湿的深厚对流不稳定层结是雹暴的主要成因;侵入蒙古低压的冷锋带动中尺度辐合线移近场区时触发强对流迅猛发展;当探空曲线呈“喇叭状”配置,并存在逆湿层时降雹概率大;数值预报产品对不稳定天气的预示性很强;可用云顶辐射亮温(TBB)值结合强对流云回波特征做场区强对流天气的临近预报。

关键词 雹暴 天气形势 诊断分析 雷达回波

中图分类号 V555 **文献标识码** A **文章编号** 1674-5825(2009)01-0051-06

1 引言

雹暴(以降雹为主的雷暴称雹暴)作为一种经常出现的自然灾害,对人类危害很大^[1],我国遭受雹灾农田每年 3600 万亩以上^[2],它是载人飞船主着陆场区(简称:场区,下同)的灾害性天气。M.M.Wolfson 于 1990 年介绍了美国因雹暴大风造成的三起重大飞行事故^[3],足以说明雹暴对航天航空活动的危害,随着综合国力的提高,我国载人航天活动日益频繁,研究场区雹暴等强对流灾害性天气就显得十分必要。目前虽然还缺乏雹暴的准确预报方法和完善的分析理论,但已经积累了较丰富的分析、预报经验^[4-11],提出了局地强雹暴理论等。按照不稳定性理论,当大气中积累一定的热力、动力不稳定能量时,在某种小扰动的触发下,不稳定能量爆发式释放,转化为空气运动的能量,形成中小尺度涡旋,引起强对流天气。因而雹暴的短期预报可从寻找雹暴发生的前期不稳定条件和促使不稳定能量释放的启动系统入手^[4],这

是本文的出发点。

2008 年 9 月 14 日场区遭受一次雹暴袭击,严重影响了场区的正常测控与管理以及神舟七号任务的前期准备工作。本文试图用较详细的资料分析这次雹暴过程,通过研究雹暴发生发展的规律和对流云团形成、发展的物理机制,提高人们对场区附近中尺度天气系统的认识,为后续的载人航天气象保障任务提供有益的参考。

2 天气过程概况

2008 年 9 月 14 日 13 时 58 分,暴风、雷雨夹着密集的冰雹袭击了场区,冰雹直径约 1.6cm,积雹厚度 3cm,单站降雹持续时间 15~20min,雹击宽度 5~10km,长度 70~100 km,地面冰雹数密度约 2500 个/m²,场区最低能见度 0.05km,最大风速 21m/s。这次强冰雹、大风、雷电天气造成“神舟七号”任务中全区搜救合练被迫推迟,场区卫星正常测控被迫停止,部分测控设施遭到破坏,严重影响了神舟七号载人航天任

来稿日期:2009-01-06

基金项目:中国载人航天工程项目基金资助

作者简介:王红军(1971.09-),男,学士,工程师,主要从事中短期天气预报和强对流天气研究。

务的正常开展,但由于气象台及时准确的预报,避免了更大的经济损失和影响。

3 气象要素的时空变化

3.1 地面要素演变

在这次雹暴过程中气象要素变化剧烈。本文利用场区自动观测系统 1 分钟/次的的数据绘出各要素的变化曲线,直观地显示出本次过程中各项要素的波动情况。由图 1 可知,雹暴来临前,场区气温高,风力弱。雹暴过境时,风向突然由东南转到西北,风力迅速增大到 21m/s,气温下降 10℃左右。相对湿度在雹暴来临时有所下降(因为云底较干冷的空气被云中的下沉气流挟卷到地面,前期降落的冰雹、雨未来得及蒸发的缘故),随着过程的持续,相对湿度快速增大,雷暴结束后,相对湿度逐渐恢复常值。水汽压在雹暴来临前 8min 急速下降,雹暴结束后,稳定少变。

3.2 云的变化

9 月 14 日 08 时场区西方浓积云不断增多,移向偏东,08 时 25 分,场区上空部分浓积云逐渐向鬃积雨云发展(表 1、表 2),8 时 30 分场区上空鬃积雨云云量 4 成,9 时 2 分场区上空出现雷暴并伴有零星降水,过程持续 1h。到了 13 时场区西方浓积云开始不

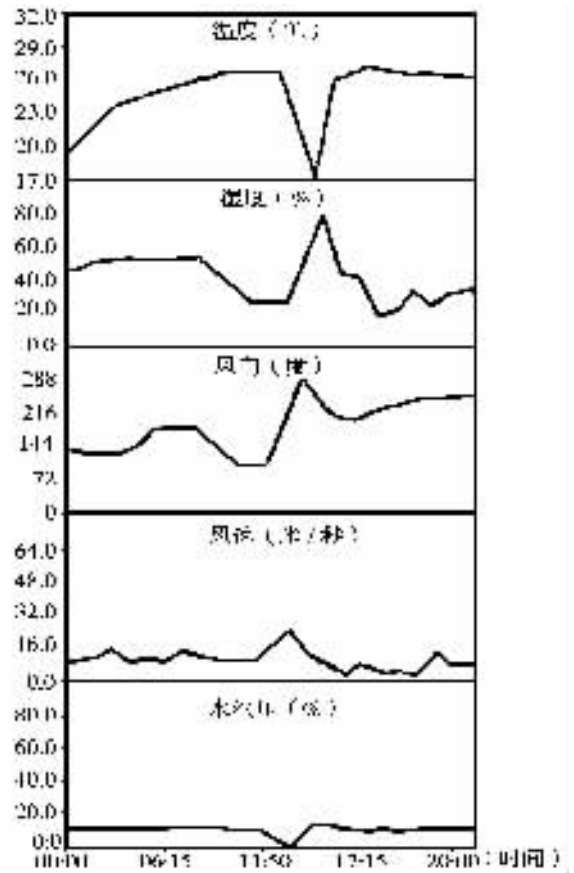


图 1 2008 年 9 月 14 日飞船主着陆场区气象要素变化

断增多,并向鬃积雨云演变,13 时 30 分,已经发展成熟的鬃积雨云不断增多并向场区靠近,场区上空鬃

表 1 2008 年 9 月 14 日飞船主着陆场区天空云的演变

时间(小时)	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
高云(云量)	无	无	无	Cidens(2)	Cidens(1)	无	无	无	无	Cifil(1)	无	无	无
中云(云量)	无	无	无	Actra(5)	Actra(4)	无	无	无	无	无	无	无	无
低云(云量)	Cuhum(6)	Cuhum(4) Cbcap(4)	Cuhum(5) Cbcap(3)	Cuhum(1)	Cuhum(3)	Cuhum(3) Cucong(2)	Cuhum(2) Cbcap(7)	Cuhum(3) Cbcap(6)	Cuhum(3) Cbcap(3)	Cuhum(4) Cbcap(1)	Cuhum(3) Cucong(2)	Cuhum(4) Cucong(3)	Cuhum(6) Cbcap(2)

(Cidens:密卷云; Actra:透光高积云; Cuhum:淡积云; Cucong:浓积云; Cbcap:鬃积雨云)

表 2 2008 年 9 月 14 日飞船主着陆场区天空鬃积雨云(Cbcap)的演变

Cbcap 出现时间	08:15	08:30	09:55	13:25	13:30	13:40	14:14	14:50	19:15	19:35	19:50
Cbcap 云量	2/2	4/4	3/3	2/2	4/4	6/6	9/9	6/6	3/3	6/6	2/2
Cbcap 云底高度(米)	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900

积雨云云量 4 成, 场区西侧出现雨幡和雷暴, 13 时 40 分场区鬃积雨云云量达到 6 成, 鬃积雨云云底高度约 900m, 场区开始出现雷暴, 13 时 58 分场区开始降冰雹, 14 时 14 分鬃积雨云覆盖了整个场区上空, 14 时 30 分鬃积雨云逐渐减少, 降冰雹过程结束。

3.3 风的时空变化

9 月 14 日 8 时 30 分以前场区高空 1000m 以下西南风, 最大风速 (16m/s) 出现在 500m 高度上, 1000m 以上西北风。8 时 40 分 1000m 以上西北风明显增大(图 2a), 以下西南风加大。9 时 1600m 以下,

原来的西~西南风突然转变为强劲的偏南风, 9 时 5 分场区出现雷暴。13 时 30 分 1000m 以上西北风加大, 1000m 以下维持西南风, 13 时 45 分 2000m 以下西南风增大明显 (1800m 高度出现 34m/s 的强劲西南风(图 2b)), 以上西北风亦迅速增大, 13 时 58 分场区出现雹暴和大风。分析表明雷暴或雹暴来临前, 场区上空低层偏南风分量和中高层偏北风分量的增加显著, 垂直风切变明显。偏北风分量的增加有利于带来干冷空气和动量扰动等, 而偏南风分量的增加则提供了充足的水汽和热量, 二者汇合易引发强对流天气。

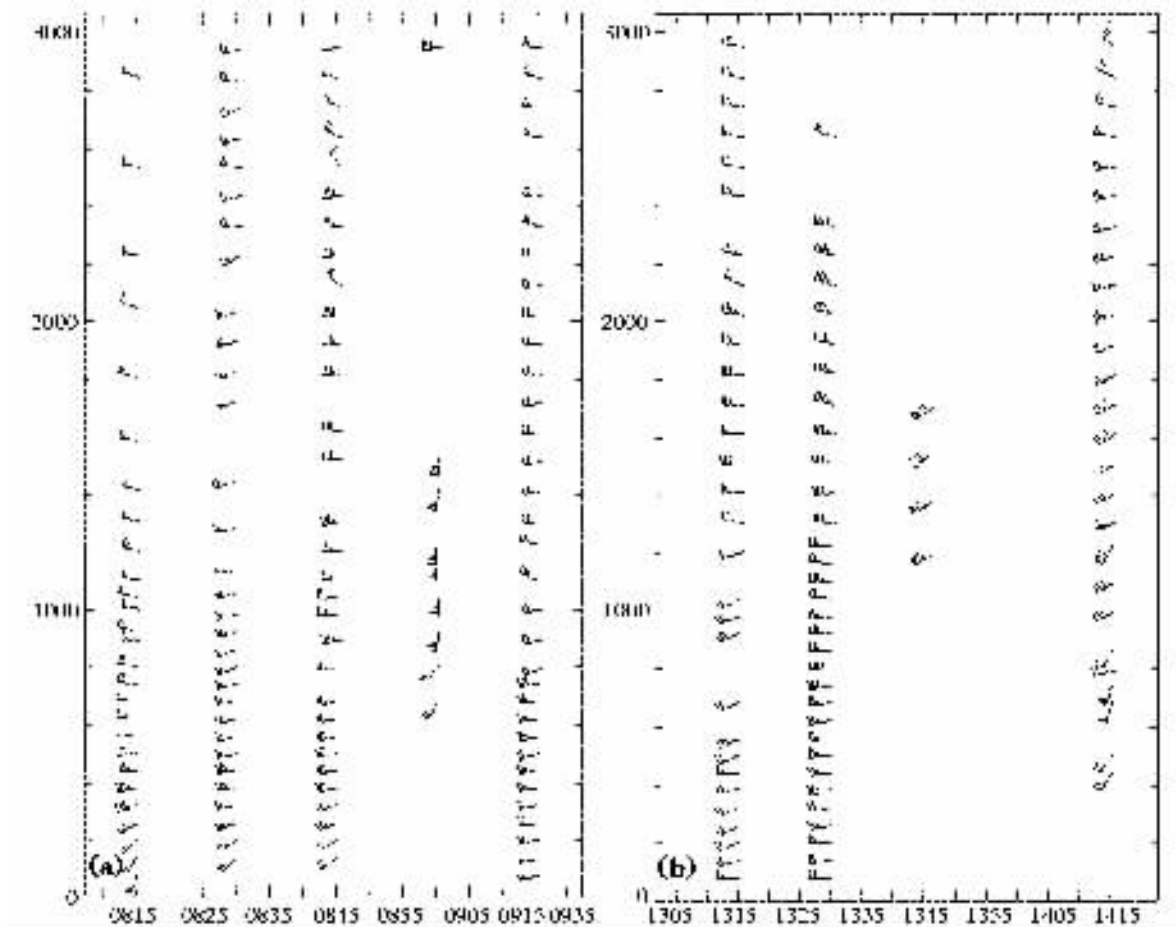


图 2 2008 年 9 月 14 日飞船着陆场区风廓线图

4 大尺度环流形势演变特征

4.1 高空环流形势

2008 年 9 月 9~10 日 500hPa 上有一先导槽经过场区, 在 500hPa 河套北部建立一支西北气流, 影响场区的第二个高空槽 13 日 8 时位于巴尔喀什湖、贝加尔湖西北侧, 第二个高空槽前的高压脊很弱, 此脊

及其相应的下沉气流 13 日经过时场区晴天, 地面最高温度 26℃, 14 日上午温度达 26℃(达到历史同期极值)。700hPa 场区西侧暖脊从西藏经河套地区伸向我国东北地区; 850hPa 河套西侧有一竖槽, 河套东侧有一斜槽, 在场区西部会合成“人字槽”, 这样高低空形势配置, 造成上冷、下暖的温度差动平流, 有利于场区层结不稳定性增大和低值系统的抬升作用。

4.2 地面形势

这次雹暴过程属冷锋配合蒙古低压型。

2008 年 9 月 11~13 日,场区受蒙古低压东南部的西南暖湿气流控制,并连续 3 天升温降压,最高温度 26.3℃。9 月 12 日 20 时地图上(图略),冷锋位于贝湖西北侧,距场区 8 个纬距处,场区西侧为蒙古低压,地图上场区北侧有一条东北~西南向辐合线,长度约 1200km。9 月 13 日 23 时,北方冷锋侵入蒙古低压, 低压前部西南风加大, 低压中心由 1008hPa 降至 14 日 8 时的 1000hPa,说明低压发展加强, 场区从 14 日 0 时开始西南风势力明显加大(9m/s), 这是典型的北方冷锋入侵蒙古低压的形势。此种形势有利于低压区强烈辐射增温, 不断加剧大气层结不稳定性。东移的冷锋和蒙古低压带动中尺度辐合线入侵场区^[8], 触发强对流迅猛发展, 引起雹暴天气。

5 物理量场的诊断分析

利用日本远东区域谱模式(简称 ASM)(模式水平分辨率为 20km,垂直 36 层)、日本全球谱模式(简称 GSM)(模式水平分辨率 60km,垂直 30 层)数值实况分析产品^[10],对本次过程的各项物理量场进行实况分析。

5.1 涡度场分析

从 2008 年 9 月 14 日 8 时 500hPa 高度场和涡度场(见图 3a、b)看,在场区西部有一个明显的低槽,且在槽中有一个正涡度带,其中心正好位于槽区,场区位于正涡度区东部,14 日 20 时该正涡度区已经东移南下控制场区,正涡度中心在场区南侧 3 个纬距处,中心值为 $6.8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 。这表

明有较强的正涡度平流自西北向东南输送到场区上空,与南下的冷空气移向一致,促使地面蒙古低压进一步发展,有利于触发强对流天气发生发展。

5.2 垂直运动

垂直运动不仅与大气中的凝结和降水过程密切相关,而且大气层结不稳定能量须在一定的上升运动条件下才能释放出来。垂直运动造成的水汽、热量、动量、涡度等物理量的垂直输送对强对流天气系统的发展影响很大,大气中的能量转换主要通过垂直运动得以实现^[12,13],因此分析垂直运动对强对流天气意义重大。从日本 ASM 模式的 700hPa 垂直运动实况分析场(见图 3c、d)看,9 月 14 日 08 时,700hPa 河套及其以北地区垂直速度为 -0.9Pa/s , 20 时河套及其以北地区垂直速度为 -2.0Pa/s , 这表明 9 月 14 日 8~20 时河套以北地区为大范围的上升运动区,且场区垂直速度呈增大局势。由此可知,场区对流层低层有很强的上升运动,近地面层辐合增强。

5.3 水汽条件分析

从 14 日 8 时场区的探空图上来看(图略),温度层结曲线与露点曲线下部紧靠,上部分离,呈喇叭状配置,表明气层呈上干下湿分布。并且在 600hPa 附近存在一个逆温层,阻碍了热量及水汽的垂直交换,使得低层增暖增湿,不稳定能量大量积累。从中低层温度露点差($T-T_d$)看,500hPa 场区相对干区,700hPa(图 3e、f)场区 $12^\circ\text{C} \leq T-T_d \leq 18^\circ\text{C}$,850hPa 场区 $T-T_d < 5^\circ\text{C}$ 。由此判断,低空湿度大,湿层浅薄,呈上干下湿分布,与探空曲线相对应,有利于强对流天气的发生发展。

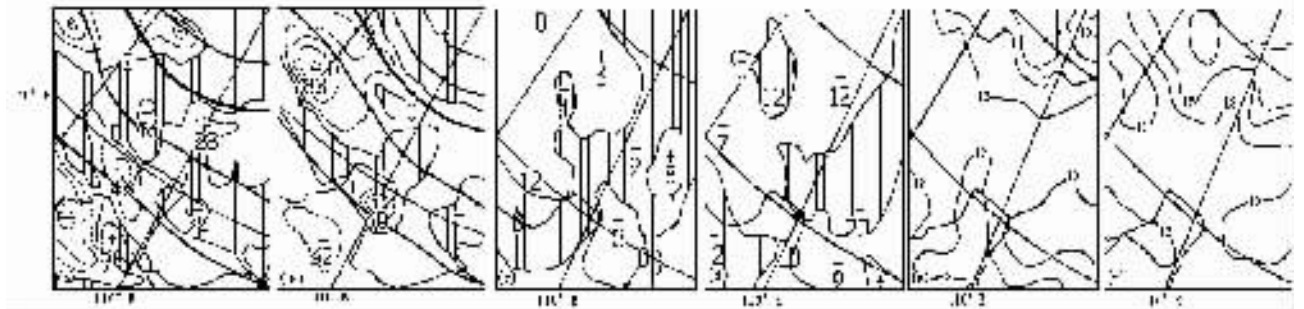


图 3 2008 年 9 月 14 日 500hPa 8 时(a)、20 时(b)涡度场(单位: 10^{-5}s^{-1}); 700hPa 8 时(c)、20 时(d)垂直运动(单位: $10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$); 700hPa 8 时(e)、20 时(f)温度露点差($T-T_d$)(单位: $^\circ\text{C}$)。日本 ASM 模式实况分析场

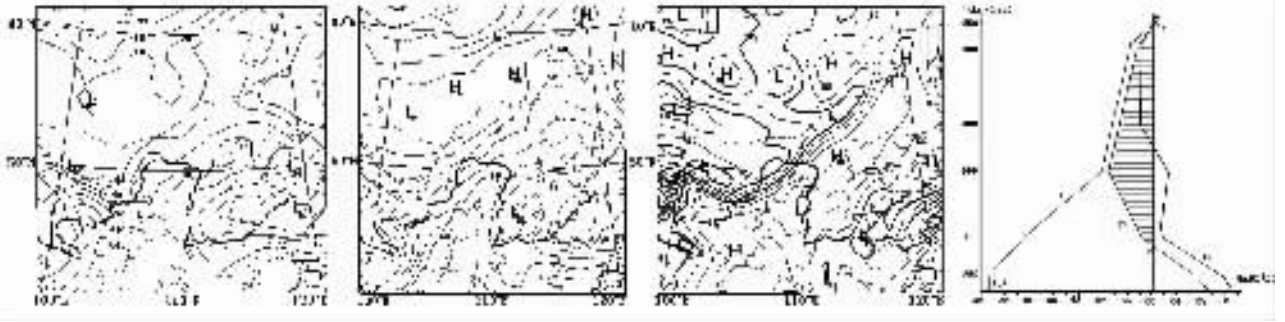


图 4 2008 年 9 月 14 日 08 时 700hPa(a)、850hPa(b) θ_{se} 场实况分析图(单位: $^{\circ}\text{C}$), 日本 GSM 模式; 2008 年 9 月 14 日 14(c) 时 K 指数场实况分析图(单位: $^{\circ}\text{C}$), 日本 GSM 模式; 2008 年 9 月 14 日 8 时干空气总温度(T_D)、总温度(T_t)、饱和总温度(T_s)廓线图(d)

5.4 稳定度分析

5.4.1 假相当位温 θ_{se} 场分析

假相当位温 θ_{se} 与空气质块的温度、湿度有关, 它能很好的反映一个地区的热力性质。从日本 GSM 模式 θ_{se} 实况分析场看, 2008 年 9 月 14 日 8 时 700hPa、850hPa θ_{se} 图上(图 4a、b), 一条高能舌自兰州伸向河套东北, θ_{se} 随高度递减, 至 400hPa 达到最低值 40°C 。深厚的 θ_{se} 随高度递减, 即 $\partial\theta_{se}/\partial p > 0$, 也就是说场区对流层低层处于对流性不稳定状态, 为强对流天气的产生创造了条件。从 K 指数场(图 4c)来看, 14 日 8 时沿场区有一东北~西南向的高值区, 中心最大 40°C , 场区为 32°C , 14 日 20 时 36°C , 计算稳定度指标 $SI = -5.9^{\circ}\text{C}$, 上述指标预示未来将有强对流天气发生。对比雹暴的降落区域可知: 强对流天气出现在 θ_{se} 舌轴北侧, 强 θ_{se} 锋区南侧(在 $45^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 范围内存在一个东西向锋区)。因此, 低层 θ_{se} 高能区舌状分布和强 θ_{se} 锋区的形成是场区强对流天气的重要特征。

5.4.2 总能量垂直廓线分析

用探空记录绘制的 T_D (干空气总温度)、 T_t (总温度)、 T_s (饱和总温度) 能量廓线图可以判定出大气层结的潮湿度, 当能量平衡高度 $P_c \leq 300 \text{ hPa}$, T_D 和 T_t 廓线间隔大, 整层空气比较潮湿, T_t 和 T_s 廓线接近时饱和能差小, 对流不稳定能量大^[13,14]。从绘制的场区 2008 年 9 月 14 日 8 时能量廓线图(图 4d)看, 能量平衡高度 P_c 在 260hPa, T_D 和 T_t 廓线在 500 hPa 以下呈喇叭状, 850 hPa 以下 T_D 和 T_t 廓线间隔很大, 说明 850 hPa 以下整层空气比较潮湿, 850 hPa 以上 T_D 和 T_t 廓线迅速靠近, T_D 和 T_t 之间间隔明显变小, 说明 850 hPa 以上水汽含量迅速减少。 T_t 和 T_s

廓线接近, 说明饱和能差小, 阴影区所代表的潜在不稳定能量区面积很大, 其主要特征线已呈现较典型的强对流结构。

6 冰雹的其它参数分析

一般来说适宜降雹的零度层高度 (H_0) 在 4km 左右, -20°C 层高度 (H_{-20}) 在 400hPa 等压面高度附近或以下。在 14 日 08 时探空图上, 零度层高度约为 4.5km, -20°C 层高度在 380hPa 附近, 有利于形成冰雹。另外, 最大上升速度 (W_m) 也可用于冰雹预报的参数。据文献[13], $W_m^2 = 2\eta R \Delta T_m (\ln P_k - \ln P_m)$, 其中 $\eta = (T_k - T_{dm})/T_k$, R 为气体常数, ΔT_m 为最大 $T' - T$ 值, 即上升气块与同高度环境的温度差, P_k 、 T_k 分别为自由对流高度的气压和温度, P_m 为最大上升速度所在高度的气压, T_{dm} 为气块由 P_k 沿干绝热线上升到 P_m 时所具有的温度。利用 9 月 14 日 08 时场区探空图计算得出 $W_m = 28.4 \text{ m/s}$, 综合 $H_0 \approx 4.5 \text{ km}$ 可知可能发生冰雹的半径约为 1.65cm 左右, 属较大冰雹, 因此可能发生降雹, 且强度较大。

7 卫星云图和雷达回波分析

7.1 卫星云图 TBB 分析及其演变

从 2008 年 9 月 14 日的云顶辐射亮温 (TBB) (图略) 看, 8 时 2 分 700hPa “人字型” 槽对应高空冷锋云系的南部, TBB 值 -14°C ; 11 时 32 分该云团发展演变为中尺度对流云系 (MCS), TBB 值 -24°C ; 12 时 02 分 MCS 发展成空间尺度为 300km 的中 α 系统, 且边界清晰, 颜色亮白, 结构密实, TBB 值降为 -45°C , 说明该云系发展较高, 此时海流图(内蒙古地方名) 东侧出现雷雨; 13 时 2 分云团在高空风上风一侧边界相对

较为整齐,呈弧形,下风方向一侧边界模糊,TBB 迅速降低至 -50°C ,中 α 对流系统达到成熟阶段,形成近似于椭圆形的中 α 尺度雹暴云团,在云团西侧可见陡的 TBB 梯度,这是伴有强降水对流系统的特征[14],此时场区处于蒙古气旋的东南部。13 时 32 分该云团移入场区上空,TBB 值没有变化,说明 MCS 已经达到鼎盛阶段,未来将减弱。13 时 40 分场区出现雷暴,13 时 58 分开始降雹。

7.2 雷达回波的演变分析

分析 9 月 14 日的 PPI 回波,13 时 18 分场区西方有一块强对流云回波,距场区 45km,中心强度 50dBz,在强回波中心左后部有明显的入流缺口(图 5a“ \nwarrow ”所指);13 时 18 分 RHI 图上显示回波顶高超过 12km,30dBz 回波顶高达 11~12km,呈纺锤形,对应 PPI 上的入流缺口,RHI 回波上有一典型的无回波穹窿区(图 5b“ \nwarrow ”所指),高度在 0.5~2.5km 之间,说明此处是上升气流的核心。在穹窿区上部有一强回波区,这是雹源区,在穹窿区前部是强度梯度很大的回波墙,其对应的地区有强烈降雹。13 时 40 分此回波以 65~70km/h 的速度向东南移动,强度进一步加强,大于 40dBz 的回波顶高达 8~10km,回波面积明显增大;13 时 42 分回波墙梯度加大,中心强度达 69dBz,距本场不足 15km;13 时 58 分场区开始降雹;14 时 42 分,回波 di 已离开场区上空向偏东方向移去,且强度明显减弱。

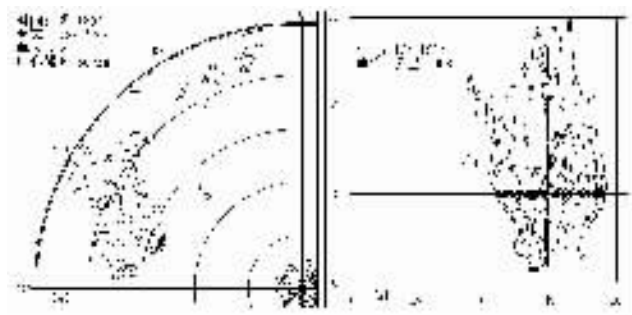


图 5 2008 年 9 月 14 日 13 时 18 分 PPI 雷达回波演变(a),“ \nwarrow ”所指为入流缺口;2008 年 9 月 14 日 13 时 18 分 RHI 雷达回波演变(b),“ \nwarrow ”所指为无回波穹窿

7.3 雷暴云团及回波路径分析

利用 2002~2008 年雷暴日的卫星云图和雷达回波资料进行统计分析,得知:

① 西北到西南部局地生成的热对流云团是影响场区的主要雷暴云团,当 TBB $<-50^{\circ}\text{C}$ 时,常有雷暴

发生。

②在雷达 PPI 回波图上,距场区 60km 以外的对流回波不能判断其未来能否影响本场,而当回波距场区 $\leq 60\text{km}$ 时,只有中心强度 $\geq 40\text{dBz}$,回波顶高 $\geq 8\text{km}$,且强回波中心分布在 230~290°扇区内的对流回波将在未来影响场区,产生雷暴、冰雹等天气。

8 2006 年、2008 年两次降雹资料的对比分析

自 2002 年在飞船主着陆场区设立常年观测站以来,共有两次降雹过程,分别出现在 2006 年 7 月 8 日和 2008 年 9 月 14 日。对这两次降雹进行对比分析,可得到如下预报指标:

① 500hpa 有高空槽东移,槽附近为正涡度区;低空较强的暖湿气流为形成强对流天气提供充足的水汽和不稳定能量;地面处于低压东南,在场区附近维持一中尺度辐合线。

② 当探空曲线呈“喇叭状”配置,并存在逆温层和适宜的 H0 和 H-20 时,降雹的概率大。

③ 当 700hpa 有上升运动区和湿区,水汽呈上干下湿分布,垂直风切变明显时可预报未来可能降雹。

9 结 论

(1)这次雹暴过程中,入侵蒙古低压的北方冷锋带动中尺度辐合线移近场区,触发强对流迅猛发展;雹暴过程中气象要素变化显著。

(2)强烈的正涡度平流和垂直上升运动,有利于地面低值系统的发展和气流的辐合;上干下湿的对流不稳定层结、明显的垂直风切变、很大的潜在不稳定能量区是这次雹暴过程的主要特征;冰雹落在 θ_{se} 舌轴的北侧和高空锋区的南侧。

(3)雹暴前期 TBB 值迅速降低,中尺度云系颜色亮白,结构密实,形成典型的强对流云系;对应雷达 PPI 回波上的入流缺口,RHI 回波上存在无回波穹窿区,在其上部的强回波区为雹源区。

(4)数值分析产品对不稳定天气的产生具有很强的预示性。从数值分析产品中能得到强对流天气产生的原因。利用数值产品、TBB 值结合强对流云回波特征,可以做强对流天气的临近预报。◇

(下转第 64 页)